



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

①2 **Offenlegungsschrift**
①0 **DE 198 26 987 A 1 (X)**

②1 Aktenzeichen: 198 26 987.0
②2 Anmeldetag: 18. 6. 98
④3 Offenlegungstag: 30. 12. 99

⑤1 Int. Cl.⁶:
G 06 F 19/00
G 06 F 17/50
A 61 B 5/00
A 61 B 6/00
G 06 T 11/00
G 06 T 17/00
// G06F 159:00

DE 198 26 987 A 1

⑦1 Anmelder:
Petersen, Jens, Dr., 79104 Freiburg, DE

⑦4 Vertreter:
Goy, W., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 79108 Freiburg

⑦2 Erfinder:
Petersen, Maren, Dipl.-Phys., 79104 Freiburg, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:
DE 43 41 367 C1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

- ⑤4 Verfahren zur Herstellung eines Modells von Organen, insbesondere der Gefäße beim menschlichen oder tierischen Körper
- ⑤7 Um bei einem Verfahren zur Herstellung eines Modells der Gefäße beim menschlichen oder tierischen Körper das Gefäßsystem eines lebenden Körpers im Modell darstellen zu können, wird zuerst ein Datensatz für die Gefäße durch eine in vivo-Untersuchung mittels einer Computerrekonstruktion erzeugt und anschließend dieser Datensatz der Gefäße zur Herstellung des Modells verwendet.

DE 198 26 987 A 1

*no model propagation,
only modeling of organs/vessels.*

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Modells von Organen, insbesondere der Gefäße beim menschlichen oder tierischen Körper.

Bei einem bekannten Verfahren wird das Modell der Gefäße bei einem toten Menschen erstellt. Hierzu werden die Gefäße mit einer aushärtenden Masse gefüllt. Anschließend wird das Gewebe um die Gefäße herum entfernt, so daß das Modell der Gefäße übrigbleibt. Nachteiligerweise kann dieses Modell der Gefäße nur an einem toten Körper erstellt werden.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren der eingangs genannten Art derart weiterzuentwickeln, daß am lebenden Körper Organe, insbesondere die Gefäße im Modell dargestellt werden können.

Zur technische Lösung wird mit der Erfindung vorgeschlagen, daß bei einem Verfahren zur Herstellung eines Modells von Organen, insbesondere der Gefäße beim menschlichen und tierischen Körper zuerst ein Datensatz für die Gefäße durch eine in vivo-Untersuchung mittels einer Computerrekonstruktion erzeugt wird und daß anschließend dieser Datensatz der Gefäße zur Herstellung des Modells verwendet wird.

Durch die Computerrekonstruktion kann der Verlauf der Gefäße dargestellt werden. Diese Darstellung der Gefäße wird dann zur Herstellung des Modells verwendet. Da der Datensatz für die Gefäße durch eine in vivo-Untersuchung geliefert wird, kann am lebenden Körper das Gefäßsystem erfaßt und im Modell dargestellt werden.

Eine besonders bevorzugte Ausführungsform der Erfindung sieht vor, daß bei der Computerrekonstruktion zwei Aufnahmen der Gefäße verwendet werden. Hierdurch wird die Untersuchungszeit beispielsweise gegenüber einem computertomographischen Verfahren in drei Dimensionen erheblich verkürzt. Die Aufnahmen werden dabei in einem schrägen Winkel zur Längsachse des Patienten aufgenommen.

Vorteilhafterweise sind die Aufnahmen Röntgenaufnahmen, welche etwa orthogonal zueinander sind. Da nur zwei Röntgenaufnahmen gemacht werden, wird auch die Strahlenbelastung für den Patienten herabgesetzt.

Um den Verlauf der Gefäße zu verdeutlichen, sieht eine weitere Ausführungsform der Erfindung vor, daß mittels der beiden Aufnahmen der Verlauf der Gefäße durch Linien nachgezeichnet und abgespeichert wird.

Um den Gefäßverlauf nachzuzeichnen, werden vorteilhafterweise Kontrollpunkte und deren Tangentenrichtungen verwendet.

Eine besonders bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung besteht darin, daß aus den beiden Aufnahmen ein dreidimensionaler Datensatz der Gefäße erstellt wird. Durch das Vorliegen des dreidimensionalen Datensatzes im Rechner sind nun die Voraussetzungen für die konkrete Herstellung des Modells geschaffen.

Zweckmäßigerweise wird zur Herstellung des Modells aus diesem Datensatz ein lithographisches Verfahren verwendet, wobei vorteilhafterweise ein stereolithographisches Verfahren verwendet wird. Hierzu wird das Modell aus Kunststoffschichten aufgebaut, wobei die einzelnen Kunststoffschichten durch ein Photopolymerisationsverfahren mit einem Laser ausgehärtet werden. Um ein präzises Modell der Gefäße zu erhalten, wird der Aufbau der Kunststoffschichten und der Laser zweckmäßigerweise von einem Rechner gesteuert.

Die Erfindung bezieht sich auch auf eine Vorrichtung zur Herstellung eines Modells der Organe, insbesondere der Gefäße beim menschlichen oder tierischen Körper, wobei das

Gefäßmodell nach dem vorstehenden Verfahren hergestellt ist. Die Vorrichtung weist eine feste Auflage für einen Körper, eine Bildaufnahmeanlage, insbesondere eine schwenkbare Röntgenanlage zur Aufnahme von zwei Bildern der Gefäße, ein Bildverarbeitungssystem zur Umwandlung der Bilder in einen dreidimensionalen Datensatz und eine rechnergesteuerte lithographische Verfahrensanlage mit einem Laser auf.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird nachstehend anhand eines Ausführungsbeispiels erläutert:

Bei dem Ausführungsbeispiel handelt es sich um ein Verfahren zur Herstellung eines Modells von Koronargefäßen. Bei akuten und chronischen Herzerkrankungen leidet der größte Teil der Patienten an einer Koronarerkrankung wie Herzinfarkt oder Angina pectoris. Bei der in vivo-Untersuchung werden Röntgenanlagen verwendet. Hierbei liegt der Patient auf einem feststehenden Untersuchungstisch und eine Röntgeneinrichtung mit Bildschirm wird frei um die Brust des Patienten bewegt. Das Herz steht dabei im Isozentrum. Bewegt man den Bildschirm um die Längsachse des Patienten, dann spricht man bei einer Drehung zur linken Seite des Patienten von einer LAO-Projektion und bei einer Drehung zur rechten Seite von einer RAO-Projektion. Durch einen Herzkatheter, der von der Leiste zum Herzen vorgeschoben wird, wird Kontrastmittel in die Abgänge der Koronararterien eingespritzt, wonach die Koronararterien im Röntgenbild als Absorptionsbild sichtbar werden. Während das Röntgenkontrastmittel durch die Koronararterien fließt, wird eine cine run mit 12,5 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Gespeichert werden diese cine runs als digitale Bilder im DICOM 3 Standardformat auf CDs. Bei der Koronarangiographie werden die Koronararterien von verschiedenen Richtungen gefilmt, um alle Abschnitte des Koronarbaumes sicher beurteilen zu können.

Die auf einer CD abgespeicherten Röntgenfilmaufnahmen können mit einem speziell entwickelten PC-Programm "Cardio view" gelesen werden. Aus zwei orthogonalen cine runs (30° RAO und 60° LAO) werden EKG-getriggert je ein enddiastolisches Bild ausgewählt, das für die Rekonstruktion geeignet ist. Wichtig ist dabei eine komplette Füllung der Koronararterien mit Röntgenkontrastmittel. Durch Kantenanhebung und Kontrastanpassung werden die Bilder vor dem Exportieren in das 3D-Studio optimiert. Die beiden orthogonalen Bilder, z. B. der linken Koronararterie, werden in die Vorlage des 3D-Studio-Programms eingesetzt. Dann beginnt der Schrift, den Verlauf der einzelnen Gefäße sicher zu erkennen und mit Hilfe von splines nachzuzeichnen. Bei Gefäßüberlagerungen kann der Verlauf unsicher werden. Durch Zurückschalten in das "Cardio view"-Programm kann zu dem Einzelbild der zugehörige cine run wieder aufgerufen werden. Durch Vorwärts- und Rückwärtsspielen kann der richtige Gefäßverlauf aus den bewegten Bildern leicht erkannt werden. Mit einer endlichen Anzahl von Kontrollpunkten und deren Tangentenrichtungen kann der gekrümmte Gefäßverlauf nachgebildet werden. Jeweils zwischen zwei Kontrollpunkten kann die Krümmung und die Lage der splines durch Einfügen eines weiteren Punktes und seines Tangentenvektors beliebig verfeinert werden, bis der wahre Verlauf angenähert ist. Nachdem der spline in RAO-Projektion für den RIA gezeichnet wurde, wird in die LAO-Projektion umgeschaltet. In dieser Projektion erscheint der spline des RIA als senkrechter Strich zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt der RAO-Projektion des RIA. Bei Abweichungen der Isozentren der beiden Filmaufnahmen muß in der LAO-Projektion eine Bildverschiebung nach oben oder unten erfolgen, bis der höchste und tiefste Punkt auch in LAO-Projektion übereinstimmt. Danach kann der spline des RIA auch in der dritten Dimension angepaßt wer-

den. Um einen korrekten Gefäßverlauf in LAO nachzuzeichnen, können weitere Kontrollpunkte eingefügt werden, die in RAO-Projektion nachjustiert werden müssen. Als Grundlage dient in jedem Falle die unterlegte Röntgenaufnahme der gleichen Projektion. Nachdem die splines für alle bedeutsamen Gefäße konstruiert wurden, haben wir einen Koronargefäßbaum aus Zentrallinien. Der nächste Schritt ist die Extrusion der Zentrallinien, um ein 3-dimensionales Gefäßsystem zu schaffen. Da der Gefäßdurchmesser nach jeder Abzweigung kleiner wird, muß die extruierte Zentrallinie an den wahren Gefäßdurchmesser angepaßt werden. Da die Strömungsgeschwindigkeit in den betrachteten Gefäßabschnitten annähernd konstant ist, muß wegen der Kontinuitätsgleichung die gesamte Querschnittsfläche etwa gleichbleiben. Die Gefäßdurchmesseranpassung ist leicht möglich mit einem Skaliermodus, mit dem die Extrusion entlang des Gefäßverlaufes dem Gefäßdurchmesser angepaßt werden kann. Nach Abschluß dieser Arbeiten liegt der 3-dimensionale Datensatz eines Koronargefäßbaumes vor, der als STL-Datei für die Stereolithographie verwendet werden kann. Abhängig von der Erfahrung und der Komplexität des Koronarbaumes, der Rechengeschwindigkeit und des verwendeten Programmes benötigt ein Modellierer 2 bis 6 Stunden für diese Arbeit.

Mittels der Computerrekonstruktion liegt nun ein 3D-Satz für die Gefäße vor. Zur Herstellung des Modells der Gefäße wird ein stereolithographisches Verfahren verwendet. Hierzu wird ein Programm verwendet, welches die Datensätze in STL-Format ausgibt, wie sie für die Stereolithographie benötigt werden. Dabei werden die Modelle aus dünnen, miteinander verbundenen Kunststoffschichten aufgebaut. Verwendet werden flüssige Epoxyharze, die schichtweise aufgetragen werden und nach dem Photopolymerisationsverfahren mit einem Laser ausgehärtet werden. Zunächst zerlegt der Rechner das Modell in dünne Scheiben und berechnet die Geometrie der einzelnen Schichten für die Aushärtung. Während des Produktionsvorganges steuert der Rechner den Strahlengang des Lasers und das Auftragen der einzelnen Kunststoffschichten. Der Koronarbaum hat einen Längsdurchmesser von etwa 10 cm und einen Querdurchmesser von 5 cm. Er beginnt mit einem Hauptstamm, der für die linke Koronararterie etwa 5 mm im Durchmesser beträgt und verzweigt sich in Äste, die wir bis zu einem Durchmesser von 1 mm herunter nachmodelliert sind. Für die Herstellung des Koronarbaumes wird eine Lithographiemaschine der Firma 3D-Systems verwendet. Es ist günstig, den Koronarbaum so auszurichten, daß der kräftige Hauptast den Fußpunkt bildet und die einzelnen Äste darauf aufgebaut werden. Damit kommt man mit weniger Stützkonstruktionen aus. Mit einer Schichtdicke von 0,15 mm wurde der Koronarbaum schichtweise aufgebaut. Zur exakten Generierung der Randkurven wird der Strahl kompensiert, d. h., der Laserstrahl wird um eine halbe Strahlenbreite (Strahlendicke 0,2 mm) nach innen verlegt.

Die Herstellung des Modells wurde anhand des lithographischen Verfahrens beschrieben. Es ist auch denkbar, den Datensatz der Gefäße dazu zu verwenden, um das Modell aus einem vollen Materialblock mit spanabhebenden Werkzeugen herzustellen. Ebenso ist es denkbar, das Modell durch Gießtechnik in Einzelteilen herzustellen, die später zusammengesetzt werden.

Das Modell der Gefäße kann auch für die Ausbildung von Kardiologen verwendet werden, die den Zusammenhang zwischen dem räumlichen 3D-Modell und der 2D-Abbildung mit dem Röntgengerät lernen müssen. Denn beleuchtet man das erfindungsgemäße Koronarmodell mit parallelem Licht, dann erhält man die gleichen Abbildungen wie auf dem Röntgenfilm.

Stellt man einen Abguß des Koronarmodells her, dann erhält man das Lumen der Koronargefäße in natürlicher Größe und Form und kann daran die Wirkungsweise der heutigen Koronarinterventionstechniken studieren, z. B. das Einsetzen von Stents oder ablativen Techniken wie der Rotablator oder der Laser-Katheter trainieren. Weiter können mit dieser Technik z. B. auch die Aorta ascendens mit Aortenklappe und Koronarabgänge nachgebildet werden. Anhand dieser Modelle können neue Katheterformen für die Koronardiagnostik und -intervention entwickelt werden. Für die Entwicklung von Herzkathetern gibt es bis heute keine naturgetreue Modelle, da bisher keine Technik hierfür zur Verfügung stand.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es möglich, am lebenden Menschen das Herzgefäßsystem zu erfassen und im Modell darzustellen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Modells von Organen, insbesondere der Gefäße beim menschlichen oder tierischen Körper, **dadurch gekennzeichnet**, daß zuerst ein Datensatz für die Gefäße durch eine in vivo-Untersuchung mittels einer Computerrekonstruktion erzeugt wird und daß anschließend dieser Datensatz der Gefäße zur Herstellung des Modells verwendet wird.
2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Computerrekonstruktion zwei Aufnahmen der Gefäße verwendet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Aufnahmen Röntgenaufnahmen sind, welche etwa orthogonal zueinander sind.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß mittels der beiden Aufnahmen der Verlauf der Gefäße durch Linien nachgezeichnet und abgespeichert wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Nachzeichnung des Gefäßverlaufs Kontrollpunkte und deren Tangentenrichtungen verwendet werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß aus den beiden Aufnahmen ein 3-dimensionaler Datensatz der Gefäße erstellt wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Herstellung des Modells aus dem Datensatz ein lithographisches Verfahren verwendet wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das lithographische Verfahren ein stereolithographisches Verfahren ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Modell aus Kunststoffschichten aufgebaut wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die einzelnen Kunststoffschichten durch ein Photopolymerisationsverfahren mit einem Laser ausgehärtet werden.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Aufbau der Kunststoffschichten und der Laser von einem Rechner gesteuert werden.
12. Vorrichtung zur Herstellung eines Modells der Organe, insbesondere der Gefäße beim menschlichen oder tierischen Körper, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gefäßmodell nach dem Verfahren gemäß einem der Anspruch 1 bis 11 hergestellt ist.